

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۱

## بررسی تجربی عملکرد آب شیرین کن خورشیدی به روش رطوبت‌زنی - رطوبت‌زدایی با استفاده از سیکل بسته آب‌وهوا

مصطفی کیانی ده‌کیانی<sup>۱\*</sup>، امین اسدزاده<sup>۲</sup>، حمید مرتضی‌پور<sup>۳</sup>، سید محمد صفی‌الدین اردبیلی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران  
m.kiani@scu.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران  
Amin71asadzadeh71@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
h.mortezapour@uk.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران  
m.safieddin@scu.ac.ir

**چکیده:** در این پژوهش، عملکرد آب شیرین کن خورشیدی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با استفاده از سیکل بسته آب‌وهوا در شهرستان اهواز مورد بررسی قرار گرفت. این آب شیرین کن شامل کلکتور، چگالنده هوا خنک، مخزن‌های آب شور و شیرین، دمنده هوا و پمپ آب است. ارزیابی این سامانه در سه سطح سرعت هوا (۳، ۴ و ۵ متر بر ثانیه) و در سه سطح دبی پمپ (۲، ۴ و ۶ لیتر بر دقیقه) انجام شد. نتایج نشان داد که کمینه بازده تبخیرکننده در روز به‌طور میانگین حدود ۵۶٪ بود که در سرعت هوا ۳ متر بر ثانیه و دبی آب ۲ لیتر بر دقیقه به دست آمد و همچنین بیشینه بازده تبخیرکننده در روز حدود ۷۹٪ بود که در سرعت هوا ۵ متر بر ثانیه و دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. همچنین بیشینه میانگین روزانه کارایی چگالنده حدود ۲۱/۵۲٪ بود که در سرعت هوای خروجی ۳ متر بر ثانیه و دبی آب عبوری ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. کمینه مقدار آب شیرین به‌دست‌آمده مربوط به سرعت هوا ۵ متر بر ثانیه و دبی ۲ لیتر بر دقیقه و بیشینه مقدار آن برای سرعت هوا ۳ متر بر ثانیه و دبی ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** کلکتور، انرژی خورشیدی، رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی، آب شیرین‌کن.

## ۱. مقدمه

رشد جمعیت و همچنین توسعه اقتصادی باعث کمبود آب شده و این امر یکی از تهدیدهای مهم در زمینه توسعه پایدار به شمار می رود. پیش بینی ها حاکی از آن است که در آینده نزدیک، آب به استراتژیک ترین نیاز جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک تبدیل می شود [۱ و ۲]. یکی از روش های تأمین آب شیرین به صورت پایدار، نمک زدایی است. آمار نشان می دهد که در سال ۲۰۱۵، حدود ۴۰۰ میلیون نفر از آب های نمک زدایی شده استفاده کردند. همچنین پیش بینی می شود که تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۱۴٪ از جمعیت جهان ناچار به استفاده از آب تصفیه شده گردند [۳]. با توجه به خشکسالی های اخیر در کشور و پایین بودن میزان بارندگی نسبت به متوسط بارندگی در جهان (یک چهارم)، ایران نیز به لحاظ آبی (به ویژه آب شیرین) دارای مشکل اساسی می باشد [۴].

آب شیرین کن ها مقدار زیادی انرژی مصرف می کنند تا از آب شور، آب تازه تولید کنند. تخمین زده شده که تولید ۱۰۰۰ متر مکعب آب تازه در روز به ۱۰۰۰۰ تن نفت در سال نیاز دارد. بنابراین با توجه به قیمت های اخیر انرژی، تأمین این میزان انرژی برای اکثر کشورهای جهان امکان پذیر نیست. در واقع آب شیرین کن های تجاری موجود که از سوخت های فسیلی استفاده می کنند، در کشورهای غنی از نفت می باشند. علاوه بر قیمت زیاد انرژی های فسیلی و نوسانات آن ها، آلودگی های زیست محیطی ناشی از آن ها به یک معضل بزرگ تبدیل شده است. مطالعات نشان می دهد که می توان با استفاده از انرژی های تجدید پذیر (انرژی خورشیدی، زیست توده، باد و زمین گرمایی) مشکلات ذکر شده را برطرف کرد [۵ و ۶]. یکی از انرژی های تجدید پذیر که اغلب در مناطقی که نیاز به آب دارند به وفور یافت می شود، انرژی خورشیدی است [۷].

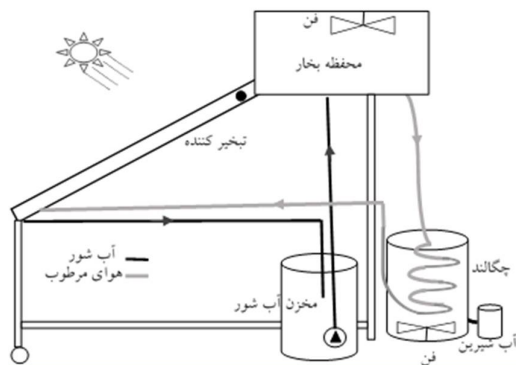
با توجه به نیاز شدید به آب شیرین از یک طرف و محدودیت های ناشی از مصرف انرژی های فسیلی از طرف دیگر، توجه به آب شیرین کن های خورشیدی امری اجتناب ناپذیر است [۸]. بر اساس تحقیقات انجام شده، آب شیرین کن های خورشیدی به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می شوند. در روش مستقیم، آب شور مستقیماً توسط حرارت خورشید تبخیر شده و سپس با تقطیر بخار آب، آب شیرین به دست می آید. روش غیرمستقیم شامل دو قسمت می باشد که یک قسمت گردآورنده است و انرژی خورشید را به صورت الکتریسیته یا گرما فراهم می کند و قسمت دیگر به صورت روش های معمول نمک زدایی مانند اسمز معکوس و تقطیر غشایی عمل می نماید [۹ و

یکی از روش های نمک زدایی خورشیدی، روش رطوبت زنی - رطوبت زدایی (HD<sup>۱</sup>) می باشد. در آب شیرین کن HD خورشیدی، هوا به عنوان سیال عامل و بر اساس اصل نفوذ جرم از طریق همرفت طبیعی یا اجباری (با استفاده از دمنده) بین واحد تبخیر کننده و چگالنده حرکت می کند [۱۱]. اصل عملیات بر اساس تبخیر آب و تقطیر بخار از هوای مرطوب است [۱۲]. سامانه آب شیرین کن خورشیدی HD به طور عمده متشکل از آبگرمکن خورشیدی (مجهز به گردآورنده خورشیدی یا متمرکز کننده های خورشیدی)، مخزن ذخیره آب گرم، رطوبت ساز (محفظه تبخیری) و محفظه رطوبت گیر (چگالنده) است. همچنین می توان با استفاده از گرمکن خورشیدی، هوای ورودی قبل از ورود به رطوبت ساز را گرم کرد [۱۳]. فرایند رطوبت زنی و رطوبت زدایی در آب شیرین کن های HD با روش های مختلفی اجرا می شود. این آب شیرین کن ها با توجه به معیارهایی همچون نحوه تأمین گرمایش، باز و بسته بودن جریان آب و هوا، چگونگی تماس آب و هوا و ... طبقه بندی می شوند [۱۴]. از لحاظ تأمین حرارت مورد نیاز فرایند، دو روش گرم کردن هوا یا گرم کردن آب وجود دارد. در این آب شیرین کن ها سیکل هوا و آب ممکن است باز یا بسته باشد. روش رطوبت زدایی از هوای مرطوب متفاوت است [۱۵]. در روش اول مخلوط هوا و بخار آب در تماس مستقیم با آب سرد قرار می گیرد. به طور کلی زمانی که غلظت رطوبت در مخلوط گرم هوا و بخار آب (که در تماس با آب سرد قرار دارد)، بیشتر از غلظت آن در فصل مشترک باشد، ذرات بخار به سمت مایع انتقال یافته و در فصل مشترک چگالیده می شود. روش دوم، روش چگالش سطحی نام دارد که در واقع از یک کندانسور برای رطوبت زدایی استفاده می شود [۱۶]. تحقیقات زیادی بر روی این نوع آب شیرین کن ها با ساختارهای مختلف انجام شده و همچنان نیز ادامه دارد [۱۷-۲۳].

در تحقیقی عملکرد یک سامانه آب شیرین کن هیبریدی HD با نوع تقطیری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با استفاده از آب گرم خروجی آب شیرین کن HD در آب شیرین کن تقطیری بازده کل سیستم ۵۰٪ و بازده آب شیرین کن تقطیری ۹۰٪ افزایش یافت [۲۴]. دنیز و سینار یک آب شیرین کن خورشیدی HD با مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی طراحی و ارزیابی کردند؛ در این تحقیق آنالیز انرژی، اکسرژی، اقتصادی و محیطی روی این سامانه انجام شد. بیشینه بازده انرژی و اکسرژی روزانه به ترتیب ۳۱/۵۴ و ۱/۸۷ به دست آمد. همچنین ظرفیت تولید آب شیرین این دستگاه حداکثر ۱۱۱۷ گرم بر ساعت بود [۲۵]. در پژوهشی دیگر عملکرد آب شیرین کن رطوبت زنی - رطوبت زدایی مجهز به صفحه فتوولتائیک - گرمایی با سیکل باز هوا و آب مورد بررسی قرار

## ۲. مواد و روش‌ها

شکل (۱)، طرح‌واره آب‌شیرین‌کن خورشیدی ساخته‌شده برای انجام تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. این سامانه شامل تبخیرکننده (کلکتور)، چگالنده، دمنده، مخزن‌های آب شور و شیرین و پمپ آب است. تبخیرکننده مورد استفاده در این تحقیق، یک ورق گالوانیزه به‌عنوان کلکتور با ابعاد  $80 \times 130$  سانتی‌متر است که برای جذب بیشتر حرارت خورشید به رنگ سیاه درآورده شد. این ورق درون یک جعبه نگهدارنده از جنس PVC به ضخامت ۱۶ میلی‌متر و در ابعاد  $80 \times 130$  سانتی‌متر قرار داده شد. بر روی این جعبه یک شیشه به ضخامت ۶ میلی‌متر به‌عنوان پوشش کلکتور استفاده شد. در بخش بالایی تبخیرکننده، لوله ورودی آب شور قرار دارد که از جنس مس بوده و وظیفه آن توزیع یکنواخت آب به‌صورت آبشاری بر روی کلکتور است (به‌منظور این کار لوله مسی با فاصله‌های مساوی سوراخ شد). از یک پمپ برای ارسال آب شور به بخش تبخیرکننده استفاده شد.



شکل (۱): طرح‌واره سامانه ساخته‌شده برای انجام آزمایش‌ها

به‌منظور ایجاد تغییرات در دبی آب از ماژول کاهنده DC به DC مدل LM2596 در مدار تغذیه پمپ آب استفاده شد. در بخش پایینی جمع‌کننده یک حفره به‌منظور تخلیه آب شور به مخزن و ایجاد سیکل بسته ایجاد شد.

همچنین در بخش فوقانی، جمع‌کننده یک فن دمنده برای ایجاد جریان هوای مرطوب و فرستادن آن به داخل چگالنده قرار داده شد. جریان هوا پس از عبور از چگالنده و از دست دادن رطوبت دوباره به بخش تبخیرکننده وارد شد و این سیکل به‌صورت بسته ادامه یافت. دمنده استفاده‌شده در این تحقیق ساخت شرکت RABIN با توان ۱۵۰ وات و ولتاژ ۲۲۰ ولت AC بود. این دمنده به‌منظور ایجاد سرعت‌های مختلف با یک دیمر تنظیم شد.

فاکتورهای آزمایش شامل دبی آب عبوری از روی سطح تبخیرکننده در سه سطح (۲، ۴ و ۶ لیتر بر دقیقه) و سرعت هوای فن در سه سطح (۳، ۴ و ۵ متر بر ثانیه) بودند. پارامترهایی که در این پژوهش

گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که بیشینه بازده تبخیر و مقدار تبخیر به‌ترتیب ۰/۸۸ و ۷/۴ کیلوگرم بود. همچنین بیشینه کارایی چگالنده و مقدار آب شیرین تولیدشده به‌ترتیب ۰/۱۱ و ۴/۸ کیلوگرم در روز به دست آمد [۲۶].

عملکرد آب‌شیرین‌کن‌ها HD علاوه بر ساختار و شرایط کاری آن‌ها، به شرایط آب‌وهوای محیط نیز وابسته است. جهانشاهی و همکاران [۲۷] تأثیر دمای آب و دمای هوای ورودی بر عملکرد یک آب‌شیرین‌کن HD با ظرفیت ۲۰ لیتر در روز را مورد بررسی قرار دادند؛ نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تأثیر دمای آب بر عملکرد سامانه بیشتر از دمای هوا بود. نادا و همکاران تأثیر نسبت هوای تازه، دمای هوای ورودی و دمای حباب مرطوب محیط بر مقدار آب‌شیرین تولیدی را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که با افزایش نسبت هوای تازه، دمای هوای ورودی و دمای حباب مرطوب، مقدار آب‌شیرین تولیدی افزایش یافت. در پژوهشی پارامترهای عملکردی یک آب‌شیرین‌کن در دماهای پایین اندازه‌گیری و تحلیل شد. یافته‌ها نشان داد که بیشینه نرخ تولید آب‌شیرین در شرایط آب گرم با دمای بالا، آب خنک‌کننده در دمای پایین، بالا بودن نرخ جریان هوا و پایین بودن نرخ جریان آب گرم به دست آمد [۲۸]. در پژوهشی دیگر، عملکرد سه نوع آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی (تک‌مرحله‌ای، دومرحله‌ای و دومرحله‌ای توسعه‌یافته) با سیکل‌های باز و بسته در شهرهایی با دما و رطوبت بالا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در همه سامانه‌ها با سیکل باز با افزایش دما و رطوبت محیط، آب‌شیرین تولیدی نیز افزایش یافت [۲۹]. نارایان و همکاران عملکرد یک آب‌شیرین‌کن با سیکل نیمه‌بسته هوا و باز آب در دما و رطوبت‌های مختلف را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که تأثیر دما محیط بر عملکرد سامانه بیشتر از رطوبت نسبی است [۳۰]. یل‌دیرم و سلماز عملکرد یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی در شرایط مختلف کاری و آب‌وهوایی را بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که افزایش دبی هوا و دبی آب ورودی بر مقدار آب‌شیرین تولیدی تأثیر مثبتی داشت [۳۱]. تحقیقات ذکرشده نشان می‌دهد که علاوه بر شرایط کاری (نوع سیکل، دبی آب و سرعت هوا ورودی و ساختار آب‌شیرین‌کن) شرایط محیطی نیز بر عملکرد آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی تأثیرگذار است. بنابراین در این تحقیق، ارزیابی عملکرد یک سامانه آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی در شهرستان اهواز به‌دلیل شرایط ویژه آب‌وهوایی (رطوبت و دما بالا) تحت شرایط کاری مختلف ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهای متغیر کاری شامل دبی‌های مختلف آب ورودی و سرعت‌های متفاوت هوا با سیکل بسته آب‌وهواست.

به ترتیب سرعت عبور هوا (m/s) و مساحت دهانه لوله خروجی سامانه (m<sup>2</sup>) هستند.

کارایی چگالنده به صورت نسبت کاهش رطوبت هوا در چگالنده به رطوبت افزوده شده به آن در تبخیرکننده تعریف می گردد. کارایی چگالنده با استفاده از رابطه (۴) تعیین می شود [۳۱].

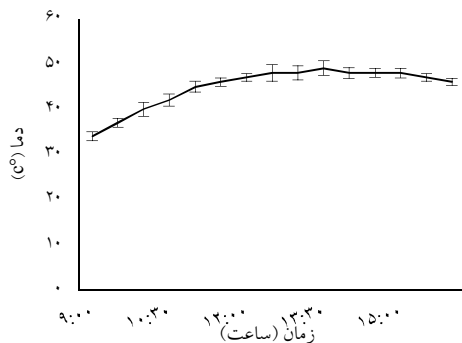
$$\eta_{co} = \frac{\omega_{E_0} - \omega_{C_0}}{\omega_{E_0} - \omega_a} \times 100 \quad (4)$$

که در آن  $\eta_{co}$  کارایی چگالنده (%)،  $\omega_{C_0}$  و  $\omega_a$  به ترتیب رطوبت مطلق هوای خروجی چگالنده و محیط (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک) هستند.

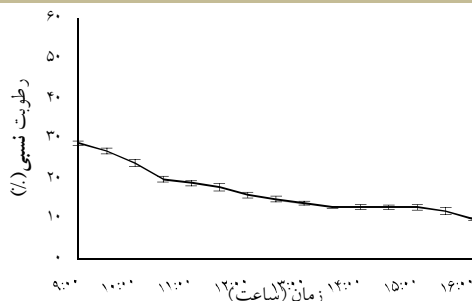
تمام آزمایش ها در تیرماه ۱۳۹۸ و در بازه زمانی ۹ صبح تا ۱۶ بعدازظهر انجام شد. آنالیز آماری داده های جمع آوری شده با استفاده از نرم افزار SPSS22 صورت گرفت.

### ۳. نتایج و بحث

تغییرات میانگین دمای محیط در زمان انجام آزمایش ها در شکل (۸) نشان داده شده است. کمینه مقدار دمای محیط در زمان انجام آزمایش ها ۳۴±۱/۱ و بیشینه مقدار آن ۴۹±۱/۵ بوده که در ساعت ۱۳:۳۰ ثبت شد.



شکل (۸): نمودار تغییرات میانگین دما در طول روزهای آزمایش



شکل (۹): رطوبت نسبی در طول انجام آزمایش ها

شکل (۹) نشان دهنده تغییرات میانگین رطوبت نسبی هوا در طی زمان انجام آزمایش هاست. بیشینه رطوبت نسبی هوا در ساعت ۹:۰۰ به میزان ۲۹±۰/۶۴ درصد و کمینه مقدار آن حدود ۱۰±۰/۳۲ درصد بود

اندازه گیری شد، شامل رطوبت نسبی خروجی تبخیرکننده و چگالنده، دمای هوا در خروجی چگالنده، تبخیرکننده و محیط، شدت تابش انرژی خورشیدی و سرعت هوا در خروجی چگالنده که در ادامه به نحوه اندازه گیری آن ها پرداخته می شود.

### ۲.۱. ابزار اندازه گیری

به منظور سنجش رطوبت نسبی هوا و دمای محیط از رطوبت سنج شرکت LUTRON کشور تایوان مدل HT-3009 استفاده شد. محدوده اندازه گیری رطوبت نسبی ۰ تا ۱۰۰ درصد با دقت ۱٪ بوده و محدوده دمای قابل اندازه گیری ۰ تا ۶۰ درجه سانتی گراد با دقت بسیار بالا بوده است.

برای اندازه گیری سرعت هوا از بادسنج شرکت LUTRON کشور تایوان مدل AM-4204 استفاده شد. محدوده اندازه گیری این دستگاه ۰/۲ تا ۲۰ متر بر ثانیه بود. همچنین بر روی پراب این دستگاه سنسور دما وجود داشت که قابلیت اندازه گیری دمای هوای عبوری را در محدوده ۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد داشت.

شدت تابش خورشید یکی از پارامترهای اساسی برای محاسبه بازده جمع کننده است که برحسب توان تابشی خورشید در واحد سطح بیان می شود. در این تحقیق، برای اندازه گیری شدت تابش خورشید بر روی سطح جمع کننده از یک دستگاه سولاری متر ساخت شرکت TES تایوان مدل I333 R استفاده شد.

### ۲.۲. محاسبه پارامترهای ارزیابی عملکرد

برای محاسبه بازده تبخیرکننده از رابطه (۱) استفاده شد [۳۲]:

$$\eta_{ev} = \frac{Q_C}{A_c \times I_t} \times 100 \quad (1)$$

که در آن،  $\eta_{ev}$  بازده تبخیرکننده (%)،  $Q_C$  نرخ گرمای مفید جمع کننده (W)،  $I_t$  تابش خورشیدی (W/m<sup>2</sup>) و  $A_c$  سطح جمع کننده (m<sup>2</sup>) است. نرخ گرمای مفید جمع کننده از رابطه (۲) تعیین شد.

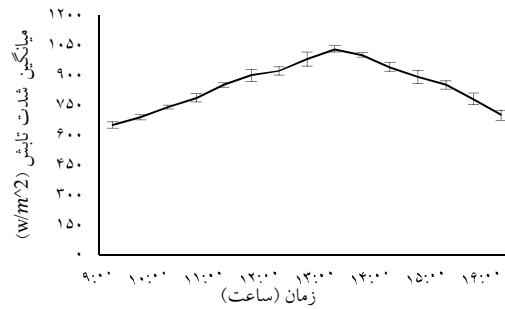
$$Q_C = \dot{m}_v \times L_f \quad (2)$$

که در آن  $\dot{m}_v$  نرخ تبخیر آب در جمع کننده (kg/s) و  $L_f$  گرمای نهان تبخیر آب (J/kg) است. نرخ تبخیر بر اساس اختلاف رطوبت مطلق هوای ورودی و خروجی از جمع کننده، با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد [۳۳].

$$\dot{m}_v = (\omega_{E_0} - \omega_{E_1}) \rho_a \times V_a \times A_t \quad (3)$$

که در آن  $\omega_{E_0}$  و  $\omega_{E_1}$  به ترتیب رطوبت مطلق جریان هوای خروجی و ورودی تبخیرکننده (کیلوگرم بخار آب بر کیلوگرم هوای خشک)،  $\rho_a$  چگالی هوای خشک عبوری (kg/m<sup>3</sup>) و  $V_a$  و  $A_t$

که در ساعت ۱۶:۰۰ ثبت شد.



شکل (۱۰): نمودار تغییرات میانگین شدت تابش در طول روزهای آزمایش

شکل (۱۰) نشان‌دهنده تغییرات میانگین شدت تابش خورشیدی در طی زمان انجام آزمایش‌هاست. بیشینه میزان تابش خورشیدی در ساعت ۱:۰۰ برابر با  $1030 \pm 17$  وات بر متر مربع و کمینه میزان در ساعت ۹:۰۰ حدود  $650 \pm 14$  وات بر متر مربع بود.

### ۳.۱. بازده حرارتی تبخیرکننده

جدول (۱) نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و سرعت هوا بر بازده تبخیرکننده را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که فاکتورهای دبی آب، سرعت هوا و همچنین اثر دوگانه آن‌ها تأثیر معناداری در سطح ۱ درصد بر بازده تبخیرکننده دارند.

جدول (۱): نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و سرعت هوا بر

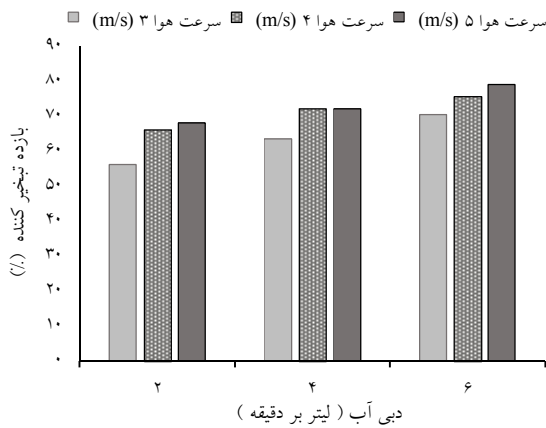
بازده تبخیرکننده

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دبی آب	۲	۴۸۰/۷۷۸	۲۴۰/۳۸۹	۴۱۳/۳۴۲**
سرعت هوا	۲	۱۲۴/۵۹۱	۲۹۵/۵۶۲	۵۰۸/۲۱۰**
دبی آب × سرعت هوا	۴	۲۵/۳۴۷	۶/۳۳۷	۱۰/۸۹۶**
خطا	۱۸	۱۰/۴۶۸	۰/۵۸۲	

\*\* اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۱٪

میانگین تغییرات بازده تبخیرکننده در شرایط مختلف دبی آب عبوری و سرعت هوای ورودی، در شکل (۱۱) آورده شده است. بر این اساس کمینه میانگین بازده تبخیرکننده در روز حدود ۵۶٪ بوده که در سرعت هوا ۳ متر بر ثانیه و دبی آب ۲ لیتر بر دقیقه به دست آمد و همچنین بیشینه میانگین بازده تبخیرکننده در روز حدود ۷۹٪ بوده که در سرعت هوا ۵ متر بر ثانیه و دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. این نمودار نشان می‌دهد که بازده تبخیرکننده با سرعت هوا رابطه مستقیم دارد و به عبارتی دیگر، افزایش سرعت هوا موجب افزایش بازده

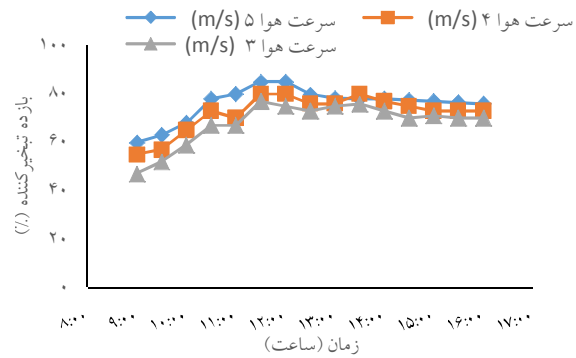
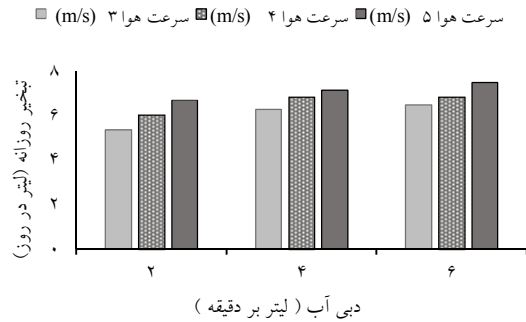
حرارتی تبخیرکننده می‌شود، به طوری که با افزایش سرعت هوا از ۴ به ۵ متر بر ثانیه در دبی ۶ لیتر بر دقیقه، بازده تبخیرکننده حدود ۷٪ افزایش یافته و از حدود ۷۲٪ به حدود ۷۹٪ رسیده است. دلیل این امر آن است که با توجه به ضریب‌های انتقال حرارت و انتقال جرم با افزایش سرعت هوای عبوری از جمع‌کننده افزایش پیدا می‌کند و موجب بهبود نرخ تبخیر از سطح آب می‌گردند.



شکل (۱۱): تغییرات میانگین بازده تبخیرکننده در شرایط مختلف آزمایش

با افزایش دبی آب در همه سرعت‌ها، بازده تبخیرکننده افزایش یافت (شکل ۱۱)، به طوری که بیشینه بازده تبخیرکننده در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. با توجه به اینکه آب به صورت آبخاری روی سطح تبخیرکننده ریخته می‌شود، در دبی‌های کمتر، آب کل سطح تبخیرکننده را پوشش نمی‌دهد و به همین دلیل با افزایش دبی آب یا به عبارت دیگر افزایش سطح تماس آب با تبخیرکننده، بازده نیز افزایش می‌یابد. تغییرات بازده حرارتی تبخیرکننده در طول روز، در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه و در سرعت‌های مختلف عبور هوا در شکل (۱۲) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، بازده تبخیرکننده در طول روز با گذشت زمان، روندی افزایشی به خود گرفته است. برای مثال، در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه، بازده تبخیرکننده از حدود ۴۷٪ در ساعت ۹ صبح به بیش از ۷۵٪ در ساعت ۱:۳۰ دقیقه عصر رسیده است. از جمله دلایل افزایش بازده تبخیرکننده در طول روز می‌توان به دو مورد اساسی اشاره کرد:

- الف. افزایش تدریجی شدت تابش خورشیدی؛
- ب. افزایش دمای آب شور ورودی به تبخیرکننده.



شکل (۱۳): تغییرات میانگین مقدار تبخیر روزانه در شرایط مختلف آزمایش

شکل (۱۲): تغییرات میانگین بازده حرارتی روزانه تبخیر کننده در دبی

آب ۶ لیتر بر دقیقه

### ۲.۳. کارایی چگالنده

نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر کارایی چگالنده در جدول (۳) آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که فاکتورهای دبی آب، سرعت هوا، تأثیر معناداری در سطح ۱٪ بر کارایی چگالنده دارند. همچنین اثر دوگانه آن‌ها تأثیر معناداری در سطح ۵٪ بر کارایی چگالنده دارد.

نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر مقدار تبخیر روزانه، در جدول (۲) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که فاکتورهای دبی آب، سرعت هوا، تأثیر معناداری در سطح ۱٪ بر مقدار تبخیر روزانه دارند. همچنین اثر دوگانه آن‌ها تأثیر معناداری در سطح ۵٪ بر میزان تبخیر روزانه دارد.

جدول (۳): نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر کارایی چگالنده

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دبی آب	۲	۱۴۰/۰۰۹	۷۰/۰۰۵	۱۸۷/۴۶۲**
سرعت هوا	۲	۲۸۳/۳۵۲	۱۴۱/۶۷۶	۳۷۹/۳۸۷**
دبی آب × سرعت هوا	۴	۴/۷۳۴	۱/۱۸۳	۳/۱۶۹*
خطا	۱۸	۶/۷۲۲	۰/۳۷۳	

\*\* اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۱٪، \* اختلاف معنی دار در سطح ۵٪

جدول (۲): نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر مقدار تبخیر روزانه

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دبی آب	۲	۴/۲۱۴	۲/۱۰۷	۴۴/۵۷۳**
سرعت هوا	۲	۵/۱۰۱	۲/۵۵۰	۵۳/۹۴۷**
دبی آب × سرعت هوا	۴	۰/۲۳۲	۰/۰۵۸	۱/۲۲۵*
خطا	۱۸	۰/۸۵۱	۰/۰۴۷	

\*\* اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۱٪، \* اختلاف معنی دار در سطح ۵٪

شکل (۱۴) تغییرات کارایی چگالنده در شرایط مختلف دبی آب عبوری و سرعت هوای ورودی را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود در دبی یکسان با کاهش سرعت هوای ورودی، کارایی چگالنده افزایش یافت. دلیل این امر این است که با کاهش سرعت هوای عبوری از چگالنده، زمان بیشتری برای چگالش بخار وجود دارد. همچنین در سرعت‌های هوای یکسان با افزایش دبی آب، به دلیل افزایش مقدار بخار در چگالنده، کارایی افزایش یافت. به طور کلی کمینه کارایی چگالنده ۷/۴۸٪ بود که برای سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه و دبی آب ۲ لیتر بر دقیقه به دست آمد و همچنین بیشینه کارایی چگالنده حدود ۲۱/۵۲٪ بود که در سرعت هوای خروجی ۳ متر بر ثانیه و دبی آب عبوری ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد.

در شکل (۱۳) تغییرات میزان تبخیر روزانه در شرایط مختلف دبی جریان آب عبوری و سرعت هوای دمیده نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که میزان تبخیر روزانه متناسب با بازده تبخیر کننده است. واضح است که هرچه بازده تبخیر کننده بیشتر باشد، میزان تبخیر آب نیز در تبخیر کننده بیشتر است. بیشینه میزان تبخیر روزانه در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه و سرعت هوای ۵ متر بر ثانیه، حدود ۷/۵ لیتر به دست آمد و همچنین کمینه میزان تبخیر آب در دبی آب ۲ لیتر بر دقیقه و سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه، حدود ۵/۴ لیتر به دست آمد.

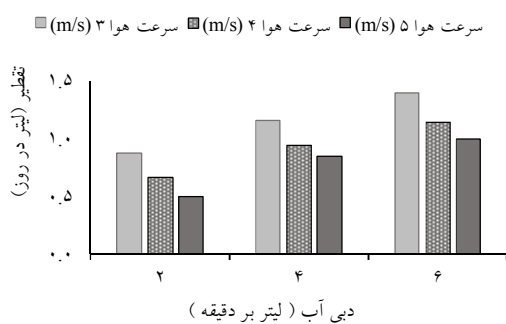
در این تحقیق میانگین میزان چگالش در دبی‌های مختلف آب و سرعت‌های متفاوت هوا نیز بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتورهای دبی آب، سرعت هوا، تأثیر معناداری در سطح ۱٪ بر مقدار چگالش روزانه دارند. همچنین اثر دوگانه آنها تأثیر معناداری در سطح ۵٪ بر میزان چگالش روزانه دارد (جدول ۴).

جدول (۴): نتایج تجزیه واریانس اثرات دبی آب و جریان هوا بر مقدار چگالش روزانه

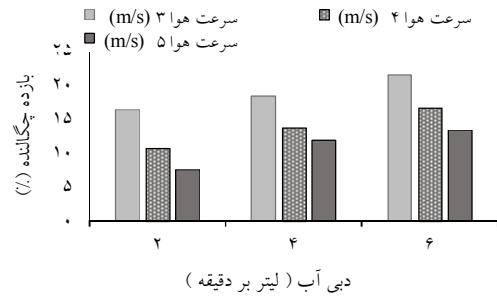
منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F
دبی آب	۲	۱/۱۴۲	۰/۵۷۱	۱۸۷/۵۶۶**
سرعت هوا	۲	۰/۶۰۴	۰/۳۰۲	۹۹/۲۷۴**
دبی آب × سرعت هوا	۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۶۶۸*
خطا	۱۸	۰/۰۵۵	۰/۰۰۳	

\*\* اختلاف معنی دار در سطح اطمینان ۱٪، \* اختلاف معنی دار در سطح ۵٪.

تغییرات مقدار چگالش روزانه در شرایط مختلف دبی آب عبوری و سرعت هوای ورودی، در شکل (۱۶) آورده شده است. با توجه به این نمودار، مقدار تولید آب شیرین توسط دستگاه آب شیرین کن مورد بررسی در این تحقیق، در شرایط مختلف آزمایشی بین ۰/۵ تا ۱/۴ لیتر در هر روز به دست آمد که کمینه میزان مربوط به تیماری با سرعت مقدار آن مربوط به تیماری با سرعت هوا ۳ متر بر ثانیه و دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه ثبت شد. همان طور که قبلاً هم ذکر شد، دلیل این امر این است که با افزایش دبی آب، کارایی تبخیرکننده افزایش یافت و با کاهش سرعت هوای ورودی، کارایی چگالنده افزایش نشان داد. بنابراین در بیشینه دبی آب و کمینه سرعت هوا، بیشینه چگالش به وجود آمد



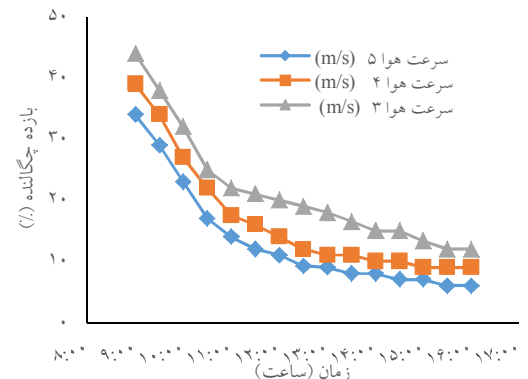
شکل (۱۶): مقدار تولید روزانه آب شیرین در شرایط مختلف آزمایش



شکل (۱۴): تغییرات میانگین کارایی چگالنده در شرایط مختلف آزمایش

شکل (۱۵) تغییرات کارایی چگالنده در طول روز را در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه و سرعت‌های مختلف عبور هوا را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، کارایی چگالنده در طول روز با گذشت زمان، روند کاهشی به خود گرفته است. با توجه به اینکه چگالنده مورد استفاده در این سامانه از نوع هواخنک بوده، دمای هوای محیط تأثیر زیادی بر عملکرد چگالنده گذاشت؛ بدین معنا که با افزایش دمای محیط کارایی چگالنده کاهش یافت. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که در دبی آب یکسان، با کاهش سرعت هوای ورودی، کارایی چگالنده بهبود می‌یابد. برای مثال در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه، کاهش سرعت دمده از ۵ به ۳ متر بر ثانیه، به‌طور متوسط موجب بهبود ۸ درصدی عملکرد چگالنده شده و از حدود ۱۳/۵ به ۲۱/۵٪ رسیده است. بنابراین در رابطه با چگالنده مورد نظر می‌توان بیان کرد که:

- الف. عملکرد چگالنده با افزایش دمای هوای محیط کاهش می‌یابد.
- ب. عملکرد چگالنده با کاهش سرعت هوای دمده افزایش می‌یابد زیرا هوای مرطوب مدت‌زمان بیشتری را در چگالنده سپری می‌کند و حرارت بیشتری را به محیط اطراف می‌دهد.



شکل (۱۵): تغییرات میانگین کارایی چگالنده در طول روزهای

آزمایش در دبی آب عبوری ۶ لیتر بر دقیقه



#### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق عملکرد یک آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی - رطوبت زدایی تحت شرایط مختلف کاری (دبی آب و سرعت هوا) در شهر اهواز بررسی شد که نتایج به دست آمده از تحقیق به طور خلاصه عبارتند از:

الف. با افزایش سرعت هوا و دبی آب، بازده تبخیرکننده افزایش یافت، به طوری که بیشینه بازده تبخیرکننده در روز حدود ۷۹٪ بوده که برای سرعت هوا ۵ متر بر ثانیه و دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه ثبت شد. دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت هوا عبوری از سطح جمع کننده، ضریب های انتقال حرارت و انتقال جرم نیز افزایش می یابد که افزایش نرخ تبخیر را به دنبال دارد.

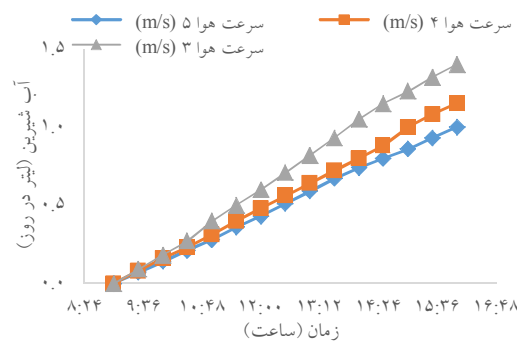
ب. بازده تبخیرکننده در طول روز با گذشت زمان، به دلیل افزایش شدت تابش و دمای آب شور ورودی روندی افزایشی داشت.

ج. با افزایش دبی آب و کاهش سرعت هوا، کارایی چگالنده افزایش یافت به طوری که بیشینه میانگین روزانه کارایی چگالنده حدود ۲۱/۵۲٪ بود که در سرعت هوای خروجی ۳ متر بر ثانیه و دبی آب عبوری ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. کاهش سرعت هوای ورودی باعث افزایش زمان برای چگالش بخار می شود. همچنین، افزایش دبی آب باعث افزایش مقدار بخار در چگالنده می شود.

د. مقدار تولید آب در شرایط مختلف آزمایشی بین ۰/۵ تا ۱/۴ لیتر در هر روز به دست آمد که بیشینه مقدار آن در تیماری با سرعت هوا ۳ متر بر ثانیه و دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه به دست آمد. دلیل این امر بیشینه کارایی چگالنده برای این تیمار است.

مقدار تجمعی آب تقطیر شده با گذشت زمان در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه و سرعت های مختلف هوا در شکل (۱۷) نشان داده شده است. این شکل بیان می کند که با گذشت زمان و تولید بخار بیشتر در تبخیرکننده، به تدریج میزان تولید آب شیرین نیز افزایش می یابد. همچنین میزان تولید آب شیرین در دبی یکسان، با کاهش سرعت هوای ورودی افزایش یافت. دلیل این امر این است که با کاهش سرعت هوا، بخارات زمان بیشتری در چگالنده برای تقطیر دارند.

مقدار تجمعی آب شیرین با وجود بازده مناسب تبخیرکننده کم است که دلیل آن هواخنک بودن چگالنده و بالا بودن دمای محیط می باشد. بنابراین برای بالا بردن میزان آب تولیدی باید دما چگالنده را کاهش داد.



شکل (۱۷) : مقدار تولید روزانه آب شیرین به صورت تجمعی در دبی آب ۶ لیتر بر دقیقه

#### مراجع

- [1] Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A. M. and Madani, K., "Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire", Journal of Hydrology, Vol. 491, pp. 23-39, 2013.
- [2] امام دوست، نازیلا، کوهی کمالی، رامین، توفیق، علی اصغر، پالیزدار، یحیی، «تعیین نقطه بهینه ترکیب آب شیرین کن چند مرحله ای تبخیری با نیروگاه سیکل ترکیبی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۴، شماره ۲، صفحه ۵۲-۶۱، ۱۳۹۳.
- [3] Cohen-Tanugi, D. and Grossman, J. C., "Water desalination across nanoporous graphene", Nano Letters, Vol. 12, No. 7, pp. 3602-8, 2012.
- [4] فلاح علمداری، علی، بررسی انواع آب شیرین کن های متداول و طراحی؛ یک نمونه آب شیرین کن خورشیدی، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.
- [5] Koroneos, C., Dompros, A. and Roumbas, G., "Renewable energy driven desalination systems modelling", Journal of Cleaner Production, Vol. 15, No. 5, pp. 449-64, 2007.
- [6] Chen, P., Lan, Y., Wang, D., Wang, W., Liu, W., and Chong Z., "Optimal planning and operation of cchp system considering renewable energy integration and seawater desalination", Energy Procedia, Vol. 158, pp. 6490-5, 2019.
- [7] Huang, L., Jiang, H., Wang, Y., Ouyang, Z., Wang, W., Yang, B., Liu, H. and Hu, X., "Enhanced water yield of solar desalination by thermal concentrated multistage distiller", Desalination, Vol. 477, pp. 114260, 2020.
- [8] Zheng, Y. and Hatzell, K. B., "Technoeconomic analysis of solar thermal desalination", Desalination, Vol. 474, pp. 114168, 2020.
- [9] Ghaffour, N., Reddy, V. and Abu-Arabi, M., "Technology development and application of solar



- energy in desalination: medrc contribution*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 5, pp. 4410-4415, 2011.
- [۱۰] نیکفر، مجید، عالم رجیبی، علی اکبر، کیم، دانگ کوک، «مروری بر مطالعات انجام شده بر روی دستگاه آب شیرین کن خازنی و مطالعه تجربی امکان سنجی اتصال آن به انرژی خورشیدی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۱۰۰-۱۱۳، ۱۳۹۹.
- [11] Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Summers, E. K., Lienhard, J. H., Zubair, S. M. and Antar, M. A., "The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 4, pp. 1187-201, 2010.
- [12] Al-Karaghoul, A. and Kazmerski, L. L., "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 24, pp. 343-56, 2013.
- [13] Shalaby, S., Bek, M. and Kabeel, A., "Design recommendations for humidification-dehumidification solar water desalination systems", Energy Procedia, Vol. 107, pp. 270-4, 2017.
- [14] Srithar, K. and Rajaseenivasan, T., "Recent fresh water augmentation techniques in solar still and hdh desalination—a review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, pp. 629-44, 2017.
- [15] Kabeel, A. and El-Said, E. M., "A hybrid solar desalination system of air humidification-dehumidification and water flashing evaporation, part i. a numerical investigation", Desalination, Vol. 320, pp. 56-72, 2013.
- [16] Zhao, Y., Zheng, H., Liang, S., Zhang, N. and Long, X., "Experimental research on four-stage cross flow humidification dehumidification (hdh) solar desalination system with direct contact dehumidifiers", Desalination, Vol. 467, pp. 147-57, 2019.
- [17] Yamal, C. and Solmus, I., "A solar desalination system using humidification-dehumidification process: experimental study and comparison with the theoretical results", Desalination, Vol. 220, No. 3, pp. 538-51, 2008.
- [18] De Oliveira Campos, B. L., Da Costa, A. O. S., De Souza Figueiredo, K. C. and Da Costa Junior, E. F., "Performance comparison of different mathematical models in the simulation of a solar desalination by humidification-dehumidification", Desalination, Vol. 437, pp. 184-94, 2018.
- [19] Xu, H., Zhao, Y., Jia, T. and Dai, Y., "Experimental investigation on a solar assisted heat pump desalination system with humidification-dehumidification", Desalination, Vol. 437, pp. 89-99, 2018.
- [20] Narayan, G. P., Sharqawy, M. H., Lienhard, V. J. H. and Zubair, S. M., "Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles", Desalination and Water Treatment, Vol. 16, No. 3, pp. 339-53, 2010.
- [21] Muller-Holst, H., "Solar thermal desalination using the multiple effect humidification (meh)-method", Solar desalination for the 21st century, Springer, pp. 215-225, 2007.
- [22] Ghazy, A. and Fath, H. E., "Solar desalination system of combined solar still and humidification-dehumidification unit", Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 11, pp. 2497-506, 2016.
- [23] Abdelmoez, W., Mahmoud, M. S. and Farrag, T. E., "Water desalination using humidification/dehumidification (hdh) technique powered by solar energy", Desalination and Water Treatment, Vol. 52, No. 25, pp. 4622-40, 2014.
- [24] Sharshir, S., Peng, G., Yang, N., Eltawil, M. A., Ali, M. K. A. and Kabeel, A., "A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater", Energy Conversion and Management, Vol. 124, pp. 287-96, 2016.
- [25] Deniz, E. and Cinar, S., "Energy, exergy, economic and environmental (4e) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification", Energy Conversion and Management, Vol. 126, pp. 12-9, 2016.
- [۲۶] مرتضی پور، حمید، مصطفوی، محمدحسن، جعفری نعیمی، کاظم، شمسی، محسن «بررسی تجربی آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی- رطوبت زدایی مجهز به جمع کننده فتولتائیک- گرمایی». نشریه مهندسی بیوسیستم ایران، دوره ۴۹، شماره ۲، صفحه ۲۹۵-۳۰۵، ۱۳۹۷.
- [27] Duffie, J. A. and Beckman, W. A., *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley and Sons, 2013.
- [28] Bahadori, M., Mazidi, M. and Dehghani, A., "Experimental investigation of new designs of wind towers", Renewable Energy, Vol. 33, No. 10, pp. 2273-81, 2008.
- [۲۹] جهانشاهی، ابراهیم، حسین خانی، علی، محمدی، سید محمد حجت «ساخت و شبیه سازی یک سیستم آب شیرین کن خورشیدی رطوبت زنی- رطوبت زدایی»، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۶، شماره ۱۲، صفحه ۲۴۸-۲۳۹، ۱۳۹۵.
- [30] Nada, S., Elattar, H. and Fouda, A., "Performance analysis of proposed hybrid air conditioning and humidification-dehumidification systems for energy saving and water production in hot and dry climatic regions", Energy Conversion and Management, Vol. 96208-27, 2015.
- [31] Fouda, A., Nada, S., Elattar, H., Rubaiee, S. and Al-Zahrani, A., "Performance analysis of proposed hybrid air conditioning and humidification-dehumidification systems for energy saving and water production in hot and dry climatic regions performance analysis of proposed solar hdh water desalination systems for hot and humid climate cities", Applied Thermal Engineering, Vol. 144, pp. 81-95, 2018.

- [32] Mahdizade, E. Z. and Ameri, M., "*Thermodynamic investigation of a semi-open air, humidification dehumidification desalination system using air and water heaters*", *Desalination*, Vol. 428, pp. 182-98, 2018.
- [33] Yildirim, C. and Solmuş, I. A., "*Parametric study on a humidification-dehumidification (hdh) desalination unit powered by solar air and water heaters*", *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 568-75, 2014.